

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков;

А.И. ЛЯЛЮК, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков;

Е.В. РОГОЖКИН, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры НТУ “ХПИ”, Харьков;

Е.А. ХРАМОВ, бакалавр, студент НТУ “ХПИ”, Харьков

О СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ВИДЕО- И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТАХ

Рассмотрены особенности приёма и обработки некогерентно рассеянных ионосферой сигналов, выделенных для цифровой обработки на видео- и промежуточной частотах. Предложена функциональная схема системы приёма и обработки сигналов на промежуточной частоте и приведены рекомендации для повышения эффективности обработки. Система позволяет использовать алгоритмы обработки, адаптируемые к состоянию ионосферы и исследуемому диапазону высот.

Ключевые слова: некогерентно рассеянный сигнал, корреляционная функция, спектр, приём и обработка сигналов.

Розглянуто особливості прийому й обробки некогерентно розсіяних іоносферою сигналів, виділених для цифрової обробки на відео- та проміжній частотах. Запропоновано функціональну схему системи прийому й обробки сигналів на проміжній частоті та приведені рекомендації для підвищення ефективності обробки. Система дозволяє використовувати алгоритми обробки, що адаптуються до стану іоносфери та досліджуваного діапазону висот.

Ключові слова: некогерентно розсіяний сигнал, кореляційна функція, спектр, прийом і обробка сигналів.

The features of the reception and processing of incoherently scattered by the ionosphere signals, which are selected for digital processing at the video and intermediate frequencies, are considered. A block diagram of a system for signal receiving and processing at the intermediate frequency is proposed. The recommendations to improve the processing efficiency are provided. The system allows to use algorithms that are adapted to the state of the ionosphere and the altitude range.

Keywords: incoherent scattered signal, correlation function, spectrum, signal reception and processing.

Введение. При некогерентном рассеянии (НР) радиоволн в ионосфере эффективное сечение рассеяния в обратном направлении зависит от локальных параметров плазмы и величины рассеивающего объема, который определяется длительностью зондирующего импульса и диаграммой направленности антенны. Для получения информации о параметрах ионосферы в достаточно широком диапазоне высот с приемлемым соотношением сигнал/шум используются радиолокаторы с произведением $P \times G$ в импульсе не менее одного гигаватта. Это требует применения больших

© Л.Я. Емельянов, А.И. Лялюк, Е.В. Рогожкин, Е.А. Храмов, 2013

антенн с эффективной поверхностью в несколько тысяч квадратных метров, что определяется объёмным характером распределения рассеивателей. Не менее важным элементом является организация работы системы обработки сигнала при гибком программно-алгоритмическом обеспечении.

На радаре НР Института ионосферы корреляционная обработка сигнала проводится после синхронного детектирования с использованием квадратурных каналов. По массиву измеренных корреляционных функций НР сигнала определяют высотное распределение температур ионов и электронов, ионный состав, а также радиальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы.

Цель работы – сравнение систем корреляционной обработки НР сигналов на видео- и промежуточной частоте и представление системы, позволяющей проводить обработку сигналов (спектральную и (или) корреляционную) с использованием предварительных записей оцифрованных значений непосредственно с выхода усилителя промежуточной частоты.

Рассмотрим некоторые аспекты.

Обработка НР сигналов на видеочастоте. На выходе синхронного детектора (СД) напряжение сигнала пропорционально $\cos \varphi$, где φ – разность фаз между принятым НР сигналом и сигналом синхронного гетеродина. Разность фаз носит случайный характер с равномерным законом распределения, и это приводит к увеличению дисперсии оценок автокорреляционной функции (АКФ) сигнала НР. Применением квадратурных каналов СД решают сразу две задачи: уменьшают дисперсию оценок АКФ сигнала НР и создают возможность измерения скорости движения ионосферной плазмы.

Обработка данных включает в себя определение АКФ НР сигнала $R_j^*(\tau_k)$ как разность оценки АКФ смеси сигнал+шум на j -м исследуемом участке дальности, протяжённость которого определяется длительностью зондирующего импульса, и оценки АКФ шума, усредненной по ряду замеров в конце радиолокационной развертки дальности, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал:

$$R_j^*(\tau_k) = R_{j(s+n)}^*(\tau_k) - \overline{R_n^*(\tau_k)}.$$

Здесь индекс «*» означает оценку соответствующего параметра при накоплении по множеству реализаций (радиолокационных развёрток), количество которых определяется длительностью сеанса наблюдений. Далее для упрощения записи этот индекс будет опущен.

Процесс обработки сигнала на каждом из участков дальности может быть сведен к тому, что АКФ НР сигнала определяют в каждом из двух квадратурных каналов и вычисляют:

$$R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{11}(t_j, \tau_k) + R_{22}(t_j, \tau_k)], \quad (1)$$

получая после нормировки оценку «действительной» составляющей нормированной АКФ НР сигнала – $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$, где t_j – радиолокационная задержка, соответствующая высоте $h_j = ct_j/2$ при вертикальном зондировании, $\tau_k = k\Delta\tau$, k и $\Delta\tau$ – номер ординаты АКФ и шаг по задержке соответственно. В выражении (1)

$$R_{11}(t_j, \tau_k) = \overline{u_1(t_j)u_1(t_j + \tau_k)}, \quad R_{22}(t_j, \tau_k) = \overline{u_2(t_j)u_2(t_j + \tau_k)}.$$

Индексы 1 и 2 соответствуют номерам квадратурного канала приёмника.

Если скорость передвижения плазмы пренебрежимо мала, составляющая $R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$ может быть использована для определения параметров ионосферы, таких как температуры ионов T_i и электронов T_e , ионного состава, электронной концентрации N_e .

В общем случае определение нормированной АКФ НР сигнала производится с учётом «мнимой» составляющей $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$:

$$r(t_j, \tau_k) = \sqrt{r_{\text{Re}}^2(t_j, \tau_k) + r_{\text{Im}}^2(t_j, \tau_k)}.$$

Составляющая $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$ определяется нормировкой полуразности взаимных корреляционных функций сигналов квадратурных каналов [1]:

$$R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{12}(t_j, \tau_k) - R_{21}(t_j, \tau_k)],$$

$$\text{где } R_{12}(t_j, \tau_k) = \overline{u_1(t_j)u_2(t_j + \tau_k)}, \quad R_{21}(t_j, \tau_k) = \overline{u_2(t_j)u_1(t_j + \tau_k)}.$$

Вертикальную составляющую скорости плазмы V_z вычисляют согласно выражению [2]:

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi n} \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{\tau_k} \arctg \frac{r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)} \right], j=1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где λ – рабочая длина волны радиолокатора НР, n – количество используемых при вычислениях V_z значений АКФ, N – количество участков дальности.

Отметим, что при измерении скорости движения плазмы особого

внимания требует контроль идентичности квадратурных каналов, так как нарушение квадратурной зависимости приводит к ошибкам измерений.

Регистрация доплеровского сдвига и асимметрии спектра НР сигнала. НР сигнал представляет собой узкополосный случайный процесс ($2\Delta f_s/f_0 \approx 10^{-4}$, где $2\Delta f_s$ – ширина спектра, f_0 – несущая частота радара). Поэтому доплеровское смещение f_d практически не приводит к появлению асимметрии его спектра, который, согласно представлениям о распределении скоростей частиц в плазме в отсутствие внешних воздействий, является симметричным (рис. 1, а). Асимметрия спектра рассеяния (рис. 1, б) может наблюдаться при любых нарушениях симметрии распределения заряженных частиц по скоростям. Она, в частности, возникает при наличии токов в плазме [3].

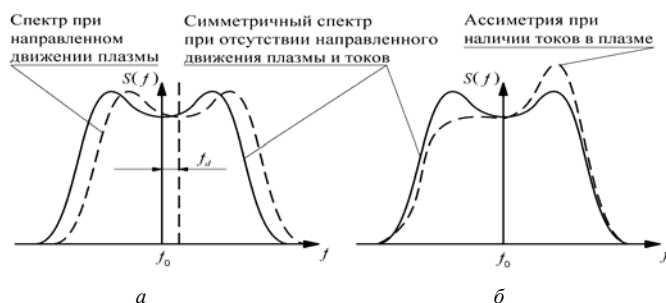


Рис. 1 – Примеры спектров: а – доплеровское смещение спектра относительно несущей частоты; б – асимметричный спектр

Для выявления асимметрии спектра при использовании синхронного детектирования требуются дополнительные вычисления, которые сводятся к оценке вида взаимной корреляционной функции квадратурных каналов. Для среднеширотной ионосферы такие вычисления обычно не проводились, считая, что в подавляющем количестве случаев спектр некогерентного рассеяния симметричен [4]. И в этом случае особого внимания требует контроль идентичности квадратурных каналов.

Из выражения (2) не следует, что отличие левой части от нуля объясняется только движением плазмы. Причиной этому могут быть и аппаратные факторы, например, нарушение симметрии АЧХ полосовых фильтров. АЧХ достаточно стабильна, и её асимметрия устраняется при регламентном контроле радиоприёмного устройства. Асимметрию спектра рассеяния достаточно уверенно можно обнаружить при спектральной обработке НР сигнала на промежуточной частоте.

Однако по измеренному спектру трудно определить его доплеровское

смещение, так как оно составляет всего лишь $10^{-3} - 10^{-4}$ от ширины спектра рассеяния. Измерения доплеровского смещения при корреляционной обработке, напротив, весьма эффективны [5–7].

Отсюда следует, что отсутствие информационных потерь может быть обеспечено использованием одновременно и корреляционной, и спектральной обработки сигнала на промежуточной частоте.

Учёт состояния ионосферной плазмы в широком диапазоне высот. В ионосфере ионный состав изменяется с высотой. Так, на высотах вблизи максимума ионизации доминируют ионы кислорода O^+ , и спектр НР сигнала достаточно узок: при длине волны $\lambda = 2$ м он не превышает 10 кГц. С увеличением высоты возрастают температуры заряженных частиц, и всё большее влияние на характер рассеяния оказывают лёгкие ионы (H^+ и He^+). Спектр расширяется, а интервал корреляции соответственно уменьшается (рис. 2). Спектр НР сигнала, рассеянного на высотах 600 км и выше, может стать почти в 4 раза шире.

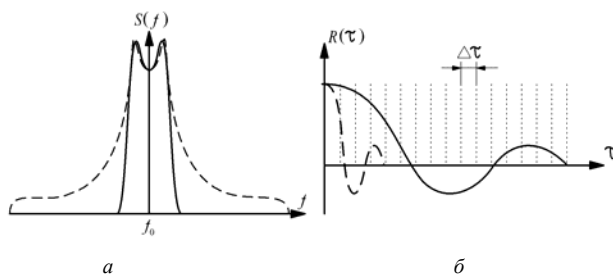


Рис. 2 – Пример спектров (а) и АКФ (б) НР сигнала для высот вблизи максимума ионизации (сплошная линия) и для высот внешней ионосферы (пунктир)

Используя результаты, приведенные в работе [5], можно получить оценки ширины спектра рассеяния $2\Delta f_s$ и интервала корреляции $\tau_{\text{корр}}$:

$$2\Delta f_s = \frac{1,24}{\lambda} \sqrt{\frac{T_i}{m_i}}, \text{ кГц}; \quad \tau_{\text{корр}} \approx 3\lambda \sqrt{\frac{m_i}{T_e}}, \text{ мс},$$

где λ , $T_{i,e}$, m_i – соответственно в метрах, градусах Кельвина и в единицах атомного веса. Характеристики плазмы в ионосфере изменяются существенно. В качестве примера в таблице приведены результаты расчётов с использованием международной справочной модели IRI-2001 для дневных значений в максимум солнечной активности [5]).

Длина волны $\lambda \approx 2$ м используется на радаре НР Института ионосферы, $\lambda \approx 0,75$ м – на радаре НР Массачусетского технологического института (США).

Практика ионосферных измерений показывает, что оптимальное

количество корреляционных каналов, определяемое интервалом корреляции и видом измеряемой АКФ НР сигнала, лежит в интервале 18–20 независимо от длины рабочей волны. При $\lambda \approx 2$ м оптимальный шаг Δt для высот вблизи максимума ионизации и ниже составляет 30–40 мкс, а для высот, где преобладают ионы водорода, – около 10 мкс.

Таблица – Результаты расчёта ширины спектра и интервала корреляции

$h, \text{ км}$	$2\Delta f_{ss}, \text{ кГц}$		$\tau_{\text{корр}}, \text{ мс}$	
	$\lambda=2 \text{ м}$	$\lambda=0,75 \text{ м}$	$\lambda=2 \text{ м}$	$\lambda=0,75 \text{ м}$
200	5	13	1,3	0,5
300	5	13	1,3	0,5
500	23	61	0,7	0,26
700	28	75	0,6	0,23
1000	33	88	0,45	0,17

Отсюда следует, что коррелометр с фиксированным алгоритмом работы не оптимален для определения высотного распределения параметров ионосферы при наблюдениях одновременно в большом интервале высот, например, от 120 до 1500 км.

Одно из возможных решений было заложено в системе обработки СКИФ [5]. Предусматривалась работа с составным сигналом, элементы которого и алгоритм их обработки выбирались в соответствии с высотным строением ионосферы.

Представляется, что более эффективное устранение отмеченного недостатка может быть осуществлено при записи оцифрованных значений смеси сигнал+шум на выходе радиоприёмного устройства. Последующее использование полученных массивов позволяло бы применять альтернативные варианты обработки с использованием высокопроизводительных ПК. Это может быть, в частности, корреляционная или спектральная обработка с оптимизированными (для каждого конкретного высотного диапазона и состояния ионосферы) параметрами.

При использовании синхронного детектирования и корреляционной обработки информационные потери можно сократить за счёт изменения шага дискретизации, однако при этом выявление асимметрии спектра значительно усложняет процедуру обработки НР сигнала [8].

Система приёма и обработки сигналов на промежуточной частоте. Чтобы всё же создать возможность выявления асимметрии спектра, например, с помощью методик, приведенных в [6, 8, 9], предлагается осуществлять аналого-цифровое преобразование непосредственно на выходе усилителя промежуточной частоты (ПЧ). При этом импульсы опроса формируются с использованием сигнала синхронного гетеродина и,

следовательно, жёстко привязаны к ПЧ [6]. Запись дискретных отсчётов сигнала осуществляется под управлением системы синхронизации радара.

Функциональная схема системы приёма, преобразования и обработки сигнала на ПЧ применительно к радару НР Института ионосферы представлена на рис 3.

На схеме выделены блоки, которые необходимо добавить к существующей системе, описанной в [10].



Рис. 3 – Функциональная схема системы приёма, преобразования и обработки сигнала. Здесь АФУ – антенно-фидерное устройство, УВЧ – усилитель высокой частоты; СМ – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты, $[f \times 4]$ – блок умножителя частоты на 4; ФОИ – формирователь импульсов опроса АЦП; ИЗП – импульс запуска передатчика; ИБН – импульс начала бланка.

Система работает следующим образом.

Принятый сигнал подаётся на вход УВЧ приёмника. В приёмном тракте осуществляется усиление и преобразование НР сигнала, в результате которого его спектр переносится на вторую ПЧ (около 1 МГц). Сигналы гетеродинов с частотами $f_{Г1}$ и $f_{Г2}$ формируются таким образом, что при отсутствии доплеровского сдвига центральная частота спектра сигнала на ПЧ ($f_{ПР2}$) равна частоте синхронного гетеродина $f_{Г2}$. С выхода приёмника преобразованный сигнал поступает на вход АЦП. Формирователь импульсов опроса вырабатывает парные импульсы с интервалом, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина. Таким образом, соответствующие им отсчёты сигнала НР находятся в квадратурной зависимости.

Парные отсчеты следуют с периодом, равным шагу задержки Δt (см. рис. 2), который задаётся программно с учётом ожидаемого характера АКФ НР сигнала на соответствующих высотах: в пределах развёртки дальности шаг Δt может быть выбран, например, 40 мкс для области, где

доминируют ионы кислорода O^+ , или 10 мкс для области, где доминируют ионы водорода H^+ .

Возможность использования пополняемой библиотеки альтернативных алгоритмов обработки, выбираемых в зависимости от высотного строения ионосферы и конкретной задачи ионосферных измерений, а также алгоритмов, реализующих цифровую фильтрацию и обработку [11–13], обеспечивает уменьшение дисперсии оценок измеряемых параметров ионосферы.

Выводы. Недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки, можно избежать, используя предварительную запись оцифрованных значений непосредственно с выходов аналоговых квадратурных каналов. Предлагаемый в данной работе способ оцифровки значений сигнала непосредственно на выходе оконечного усилителя промежуточной частоты дополнительно позволяет избавиться от недостатков, присущих аналоговым схемам. Такой подход открывает возможность проводить спектральную и (или) корреляционную обработку НР сигнала на промежуточной частоте в согласованной полосе частот, учитывать характерные особенности плазмы на разных высотах, выявлять и оценивать асимметрию спектра, которая может свидетельствовать о характере реакции плазмы на возмущение её равновесного состояния.

Список литературы: 1. Брюнелли Б.Е., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 2. Yemelyanov L.Ya., Dzyubanov D.A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, № 14. – P. 1313-1327. 3. Rosenbluth M.N., Rostoker N. Scattering of electromagnetic waves by a non-equilibrium plasma // Phys. Fluids. – 1962. – Vol. 5, № 7. – P. 776-788. 4. Evans J.V., Brockelman R.A., Julian R.F. et al. Determination of F-region vertical drifts at Millstone Hill // Radio Sci. – 1970. – Vol. 5, № 1. – P. 27-38. 5. Рогожский Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 6. Рогожский Е.В. Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния / Ионосферные исследования. – 1979. – № 27. – С. 46-59. 7. Емельянов Л.Я., Григоренко Е.И., Скляров И.Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 136. – С. 102-108. 8. Rino C.L. Radar measurement of ionosphere motion in the presence of current-induced spectral asymmetries // Radio Sci. – 1972. – Vol. 7, № 11. – P. 1049-106. 9. Щербаков А.А., Медведев А.В., Кушнарёв Д.С. Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным наблюдений на иркутском радаре НР // Солнечно-земная физика. – 2010. – Вып. 16. – С. 3-8. 10. Емельянов Л.Я. Радиоприемное устройство радара некогерентного рассеяния // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков, 1999. – Вып. 31. – С. 108-112. 11. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с. 12. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с. 13. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов. Часть 1, 2. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. – 199 с.

Поступила в редколлегию 02.04.2013